

**PERANCANGAN *HORIZONTAL AXIS WINDPUMP* DENGAN  
KAPASITAS 65 Liter/menit PADA RENTANG KECEPATAN  
ANGIN 4 – 6 m/s DI PULAU KARIMUNJAWA KABUPATEN  
JEPARA**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar  
Sarjana Teknik**



**Oleh :**

**BAGUS SURYA PREMONO  
NIM. I0412011**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SEBELAS MARET  
SURAKARTA  
2016**

## **Perancangan *Horizontal Axis Windpump* dengan Kapasitas 65 Liter/menit pada Rentang Kecepatan Angin 4 – 6 m/s di Pulau Karimunjawa Kabupaten Jepara**

**Bagus Surya Premono**

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret  
Surakarta, Indonesia

E-mail: bagussuryap2@gmail.com

### **ABSTRAK**

Keterbatasan air menjadi masalah yang cukup serius di beberapa wilayah di Indonesia. Rasio elektrifikasi yang masih kecil dan tidak meratanya persebaran energi listrik menjadi salah satu penyebab. Sebagai salah satu destinasi wisata unggulan, pulau Karimunjawa masih memiliki beberapa kendala, salah satunya adalah belum tersuplai listrik secara penuh yang mengakibatkan keterbatasan air di wilayah tersebut. Energi terbarukan merupakan solusi untuk mengatasi kendala keterbatasan air yang terjadi. Dengan potensi angin berada pada rentang 4-6 m/s, pulau Karimunjawa dipilih sebagai lokasi perancangan *Windpump* sumbu horisontal dengan kapasitas 65 liter/menit. Data angin diperoleh dari Stasiun BMKG Meteorologi Maritim Semarang dengan rentang data sepanjang tahun 2014. Analisa data angin dilakukan dengan metode Weibull. Dari analisa data angin yang telah dilakukan, diperoleh nilai kecepatan angin rata-rata ( $V_m$ ), parameter bentuk ( $k$ ) dan parameter skala ( $c$ ) masing-masing adalah 5,61 m/s; 3,38 dan 5,93 m/s. Nilai koefisien daya ( $C_p$ ) dan rasio kecepatan pada ujung ( $\lambda$ ) yang digunakan masing-masing adalah 0,3 dan 1. Desain sudu yang digunakan adalah sudu berbentuk melengkung dengan kelengkungan sebesar 10%, sudut serang  $40^\circ$  dan jumlah sudu 18 buah. Dari hasil perancangan diperoleh luas sapuan rotor sebesar  $8,8 \text{ m}^2$ ; diameter sudu 3,4 m; rasio transmisi 0,56 dan tinggi hub sebesar 15 m.

*Kata kunci: perancangan, turbin angin, Windpump sumbu horisontal, pulau karimunjawa, keterbatasan air*

## **Design of Horizontal Axis Windpump with Capacity of 65 Liter/minute at Wind Speed Range of 4-6 m/s for Karimunjawa Island Jepara**

**Bagus Surya Premono**

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering  
Sebelas Maret University  
Surakarta, Indonesia  
E-mail: bagussuryap2@gmail.com

### **ABSTRACT**

The limitation of water become serious problem for the several places in Indonesia. The small electrification ratio and uneven distribution of electrical energy is one of the causes. As one of the best travel destinations, Karimunjawa island still has some shortages, one of the shortages is not having the electricity continuously and it cause the limitation of water in that site. Renewable energy is the solution to overcome those limitation. As the site having wind speed potential range from 4 m/s until 6 m/s, Karimunjawa island is chosen as the location of the design of the horizontal axis windpump having capacity of 65 liter/minute. The wind speed data is gained from BMKG Meteorological Maritime Station of Semarang with range of data along 2014. The Weibull method is used to analyze the wind data. From the analysis of wind speed data, it can be shown that the value of mean wind speed ( $V_m$ ), shape parameter ( $k$ ) and scale parameter ( $c$ ) are 5.61 m/s; 3.38 and 5.93 m/s, respectively. The value of power coefficient ( $C_p$ ) and tip speed ratio ( $\lambda$ ) that have been used are 0.3 and 1, respectively. The blade design that has been used are the curved blade with the curvature of 10%, angle of attack of  $40^\circ$  and the number of blade is 18 pieces. Based on the design, the windpump has rotor swept area of  $8.8 \text{ m}^2$ , blade diameter of 3.4 m, transmission ratio of 0.56 and hub height of 15 m.

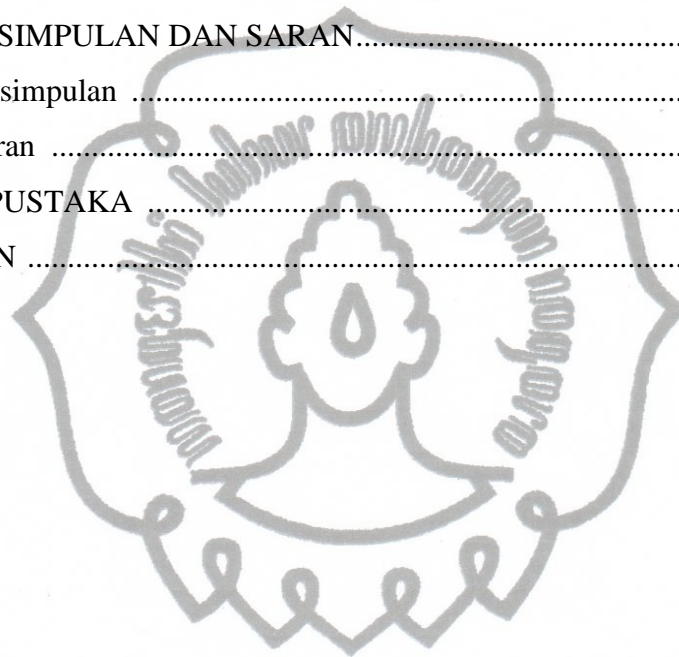
*Keywords: design, wind turbine, horizontal axis windpump, karimunjawa island, limitation of water*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN SURAT PENUGASAN TUGAS AKHIR.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN .....	iv
HALAMAN MOTTO .....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN .....	vi
KATA PENGANTAR .....	vii
ABSTRAK .....	ix
ABSTRACT .....	x
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
DAFTAR NOTASI.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah .....	3
1.4. Tujuan Penelitian .....	3
1.5. Manfaat Penelitian .....	4
1.6. Sistematika Penulisan .....	4
BAB II DASAR TEORI .....	5
2.1. Tinjauan Pustaka.....	5
2.2. Dasar Teori.....	6
2.2.1. Pengertian angin .....	6
2.2.2. Energi angin .....	7
2.2.3. Potensi energi angin.....	8
2.2.4. Turbin angin.....	14
2.2.5. Turbin angin sebagai penggerak pompa .....	15
2.2.6. Perhitungan pada <i>windpump</i> .....	17

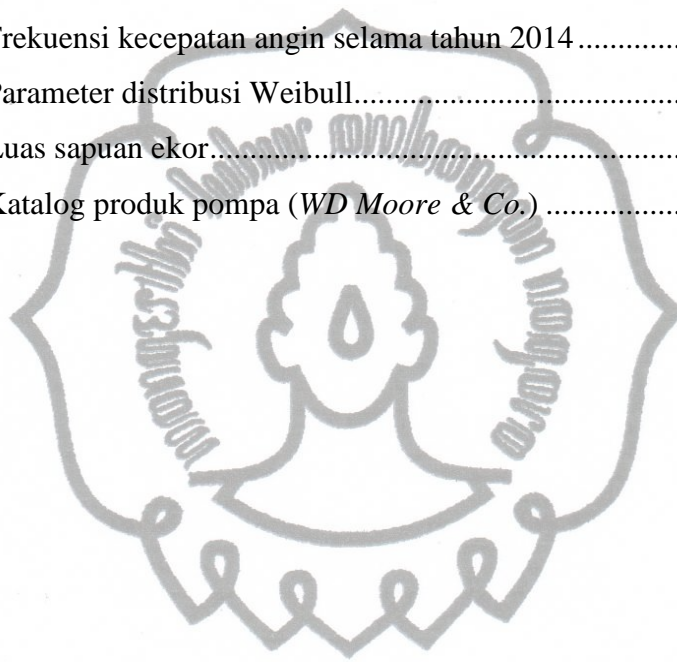
2.2.7. Poros .....	19
2.2.8. Pasak .....	21
2.2.9. Bantalan (Bearing) .....	22
2.2.10. <i>Basic static load rating</i> dan <i>dynamic load rating</i> pada bantalan .....	25
2.2.11. Pegas .....	26
2.2.12. Performa <i>windpump</i> .....	28
<b>BAB III METODOLOGI PERANCANGAN</b> .....	30
3.1. Tempat Penelitian .....	30
3.2. Alat dan Bahan .....	30
3.3. Prosedur Penelitian .....	30
3.3.1. Studi literatur .....	30
3.3.2. Pengumpulan data angin dan lokasi .....	30
3.3.3. Pengolahan data angin .....	30
3.3.4. Perancangan <i>windpump</i> .....	31
3.3.5. Menggambar desain <i>windpump</i> .....	31
3.4. Diagram Alir Perancangan .....	31
3.5. Jadwal Pelaksanaan .....	32
<b>BAB IV ANALISA DAN PERANCANGAN</b> .....	33
4.1. Analisa Potensi Angin .....	33
4.1.1. Lokasi perancangan .....	33
4.1.2. Lokasi pengambilan data .....	33
4.1.3. Perhitungan data angin .....	34
4.1.4. Perhitungan distribusi Weibull .....	37
4.1.5. Perhitungan energi angin .....	39
4.1.6. Penentuan arah angin .....	41
4.2. Perancangan <i>Windpump</i> .....	42
4.2.1. Perhitungan dimensi rotor dan pompa piston .....	43
4.2.2. Perancangan sudu rotor <i>windpump</i> .....	46
4.2.3. Diameter poros rotor <i>windpump</i> .....	49
4.2.4. Diameter poros roda gigi penggerak pompa .....	55
4.2.5. Menentukan ukuran pasak poros rotor <i>windpump</i> .....	60
4.2.6. Menentukan ukuran pasak poros roda gigi .....	61

4.2.7. Pemilihan bantalan.....	63
4.2.8. Mekanisme perlindungan terhadap <i>windpump</i> .....	68
4.2.9. Perancangan komponen pompa .....	74
4.2.10. Tower .....	76
4.2.11. Gambar desain 3D <i>windpump</i> .....	77
4.3. Karakteristik Performa <i>Windpump</i> .....	79
4.3.1. Menentukan nilai $v_{in}$ .....	80
4.3.2. Menentukan nilai $v_{min}$ .....	80
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	81
5.1. Kesimpulan .....	81
5.2. Saran .....	81
DAFTAR PUSTAKA .....	82
LAMPIRAN .....	85



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Faktor Km dan Kt .....	20
Tabel 2.2. Dimensi pasak berdasarkan diameter poros.....	21
Tabel 2.3. Nilai X dan Y untuk bantalan beban dinamik.....	26
Tabel 2.4. Tabel ukuran standar diameter kawat pegas .....	28
Tabel 3.1. Jadwal pelaksanaan .....	32
Tabel 4.1. Kecepatan angin di lokasi perancangan Januari 2014 .....	35
Tabel 4.2. Frekuensi kecepatan angin selama tahun 2014 .....	36
Tabel 4.3. Parameter distribusi Weibull.....	38
Tabel 4.4. Luas sapuan ekor.....	70
Tabel 4.5. Katalog produk pompa (WD Moore & Co.) .....	74





## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Peta persebaran angin di Indonesia .....	2
Gambar 2.1 Sirkulasi udara atmosfer .....	7
Gambar 2.2 Paket udara yang melewati rotor turbin .....	8
Gambar 2.3 Fungsi probabilitas kerapatan Weibull.....	9
Gambar 2.4 Fungsi distribusi kumulatif Weibull.....	10
Gambar 2.5 Fungsi probabilitas kerapatan Weibull dengan variasi faktor bentuk .....	11
Gambar 2.6 Fungsi distribusi kumulatif Weibull dengan variasi faktor bentuk .....	11
Gambar 2.7 Turbin angin sumbu horisontal .....	15
Gambar 2.8 Turbin angin sumbu vertikal .....	15
Gambar 2.9 Mekanisme <i>windpump</i> .....	17
Gambar 2.10 Pasak.....	21
Gambar 2.11 Bagian-bagian <i>ball bearing</i> .....	23
Gambar 2.12 Skema pembebanan bantalan radial .....	23
Gambar 2.13 Skema pembebanan bantalan aksial.....	24
Gambar 2.14 Skema bantalan luncur .....	24
Gambar 2.15 Skema bantalan gelinding .....	24
Gambar 2.16 Koefisien torsi beberapa tipe turbin angin .....	29
Gambar 3.1. Diagram alir perancangan <i>windpump</i> .....	31
Gambar 4.1 Pulau Karimunjawa .....	33
Gambar 4.2 Lokasi Stasiun BMKG Meteorologi Maritim Semarang .....	34
Gambar 4.3 Grafik fungsi kerapatan probabilitas Weibull .....	38
Gambar 4.4 Grafik fungsi distribusi kumulatif Weibull .....	39
Gambar 4.5 Grafik perolehan energi di lokasi perancangan .....	40
Gambar 4.6 Grafik frekuensi arah angin kumulatif .....	41
Gambar 4.7 Grafik arah angin berdasarkan kecepatan angin .....	42
Gambar 4.8 Proyeksi rotor terhadap arah datangnya angin .....	48
Gambar 4.9 Sudu <i>windpump</i> , (a) Dimensi pangkal sudu, (b) Dimensi ujung sudu, (c) Pandangan isometri sudu .....	48



Gambar 4.10 Skema poros rotor <i>windpump</i> .....	50
Gambar 4.11 Diagram benda bebas komponen gaya vertikal poros rotor.....	52
Gambar 4.12 Diagram benda bebas komponen gaya horisontal poros rotor .....	53
Gambar 4.13 Skema poros roda gigi penggerak pompa .....	56
Gambar 4.14 Diagram benda bebas komponen vertikal poros roda gigi.....	57
Gambar 4.15 Diagram benda bebas komponen horisontal poros roda gigi .....	58
Gambar 4.16 Pasak.....	60
Gambar 4.17 Mekanisme <i>furling action</i> , (a) Kondisi saat kecepatan angin normal, (b) Kekuatan pegas masih mengakomodasi kecepatan angin yang terjadi, (c) Kondisi sistem saat kecepatan angin tinggi.....	69
Gambar 4.18 Pegas mekanisme <i>furling action</i> , (a) Pandangan isometri pegas, (b) Ujung pegas.....	74
Gambar 4.19 Komponen pompa, (a) <i>Plunger</i> /piston, (b) Strainer, (c) Batang pompa .....	75
Gambar 4.20 Dimensi tower <i>windpump</i> .....	77
Gambar 4.21 Tower <i>windpump</i> , (a) Pandangan isometri, (b) Ilustrasi 3D tower bagian atas, (c) Ilustrasi 3D tower bagian bawah.....	77
Gambar 4.22 Desain 3D rotor <i>windpump</i> .....	78
Gambar 4.23 Desain 3D <i>windpump</i> pandangan samping .....	78
Gambar 4.24 Desain 3D <i>windpump</i> secara keseluruhan.....	79

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel data kecepatan angin selama tahun 2014.....	86
Lampiran 2. Tabel hasil perhitungan $V_{E_{max}}$ perbulan selama tahun 2014 .....	92
Lampiran 3. Tabel hasil perhitungan data kecepatan angin tahun 2014.....	92
Lampiran 4. Tabel hasil perhitungan arah angin selama tahun 2014.....	92
Lampiran 5. Tabel standar ukuran pasak .....	93
Lampiran 6. Tabel standar ukuran bantalan.....	94
Lampiran 7. Tabel nilai koefisien <i>drag</i> .....	97
Lampiran 8. Tabel spesifikasi produk pompa.....	98
Lampiran 9. Tabel kekuatan material.....	99
Lampiran 10. Gambar 2D <i>Windpump</i> .....	102
Lampiran 11. Gambar 2D Rotor <i>Windpump</i> .....	103
Lampiran 12. Gambar 2D Sudu <i>Windpump</i> .....	104
Lampiran 13. Gambar 3D Sistem Transmisi.....	104
Lampiran 14. Gambar 2D Poros Rotor .....	105
Lampiran 15. Gambar 2D Poros Pinion.....	106
Lampiran 16. Gambar 2D Roda Gigi.....	107
Lampiran 17. Gambar 2D Pinion.....	108
Lampiran 18. Gambar 2D Hub Rotor .....	109
Lampiran 19. Gambar 2D Batang Ekor .....	110
Lampiran 20. Gambar 2D Kipas Ekor .....	111
Lampiran 21. Gambar 2D Pegas Ekor .....	112

## DAFTAR NOTASI

$A_{\text{ekor}}$	= Luas sapuan ekor ( $\text{m}^2$ )	$i$	= Perbandingan transmisi
$A_P$	= Luas penampang pompa ( $\text{m}^2$ )	$k$	= Parameter bentuk
$A_{\text{rotor}}$	= Luas sapuan rotor ( $\text{m}^2$ )	$K_m$	= <i>Shock factor</i>
$A_{\text{sudu}}$	= Luas sudu ( $\text{m}^2$ )	$K_s$	= <i>Service factor</i>
$B$	= Jumlah sudu	$K_t$	= <i>Fatigue factor</i>
$c$	= Parameter skala ( $\text{m/s}$ )	$L$	= Umur bantalan (putaran)
$C$	= <i>Dynamic load rating</i> (N)	$l$	= Panjang pasak (mm)
$C_D$	= Koefisien <i>drag</i>	$L_0$	= Panjang awal pegas (m)
$C_{PD}$	= Koefisien daya desain	$L_1$	= Panjang pegas setelah meregang (m)
$D$	= Diameter rata-rata kumparan pegas (mm)	$L_f$	= <i>Free length</i> pegas (m)
$D_i$	= Diameter dalam kumparan pegas (mm)	$L_H$	= Umur bantalan (jam)
$D_o$	= Diameter luar kumparan pegas (mm)	$L_{\text{sudu}}$	= Panjang sudu (m)
$D_P$	= Diameter pompa (m)	$M$	= Momen lentur (Nm)
$d_R$	= Diameter poros pinion (m)	$M_e$	= Momen lentur ekivalen (Nm)
$d_G$	= Diameter poros roda gigi (m)	$n$	= Jumlah putaran kumparan pegas
$D_{\text{rotor}}$	= Diameter rotor (m)	$N_p$	= Jumlah penduduk
$E_D$	= Kerapatan energi angin ( $\text{kW.jam/m}^2$ )	$N_T$	= Kecepatan putar rotor (rpm)
$F_D$	= Gaya drag (N)	$p$	= pitch pegas (mm)
$FS$	= Faktor keamanan	$P_D$	= Kerapatan daya angin ( $\text{kW/m}^2$ )
$g$	= Percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )	$P_w$	= Daya <i>windpump</i> (Watt)
$G$	= Modulus kekakuan ( $\text{kN/mm}^2$ )	$Q_P$	= Debit air ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$H$	= <i>Head</i> total (m)	$r$	= Jari-jari pergerakan engkol pompa piston (m)
		$s$	= Langkah piston (m)

$S$	= Soliditas rotor	$\sigma_y$	= <i>Yield strength</i> (MPa)
$t$	= Tebal pasak (mm)	$\sigma_c$	= <i>Tensile strength</i> (MPa)
$T$	= Momen puntir (Nm)	$\sigma_i$	= Tegangan tarik ijin (MPa)
$T_e$	= Momen puntir ekivalen (Nm)	$\tau_i$	= Tegangan geser ijin (MPa)
		$\tau_k$	= Tegangan geser maksimum pasak (MPa)
$V_E$	= Kecepatan angin energi maksimum (m/s)	$\sigma_{ck}$	= Tegangan <i>crushing</i> pasak (MPa)
$V_F$	= Kecepatan terbanyak (m/s)	$\delta$	= Panjang mulur (m)
$v_{in}$	= Kecepatan angin start (m/s)		
$V_m$	= Kecepatan angin rata-rata (m/s)		
$V_{maks}$	= Kecepatan angin maksimum (m/s)		
$v_{min}$	= Kecepatan angin stop (m/s)		
$V_P$	= Kecepatan linier pompa (m/s)		
$w$	= Lebar pasak (mm)		
$W$	= Beban ekivalen dinamik (N)		
$W_A$	= Beban aksial (N)		
$W_R$	= Beban radial (N)		
$\sigma_v$	= Standar deviasi (m/s)		
$\rho_a$	= Densitas air (kg/m <sup>3</sup> )		
$\rho_u$	= Densitas udara (kg/m <sup>3</sup> )		
$\eta_p$	= Efisiensi pompa		
$\eta_v$	= Efisiensi volumetrik		
$\lambda$	= <i>Tip speed ratio</i>		
$\omega_w$	= Kecepatan sudut rotor (rad/s)		
$\omega_p$	= Kecepatan sudut pompa (rad/s)		
$\alpha$	= Sudut serang (°)		

## HALAMAN MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

**(Q.S. Al-Baqarah: 286)**

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”

**(Q.S. Al-Insyirah: 5-6)**

“...Dan sampaikanlah kabar gembira kepada orang-orang yang sabar, (yaitu) orang-orang yang apabila ditimpa musibah, mereka berkata, Sesungguhnya kami milik Allah dan kepada-Nyalah kami kembali.”

**(Q.S. Al-Baqarah: 155-156)**

“Setiap makhluk hidup merupakan mesin penggerak alam semesta.”

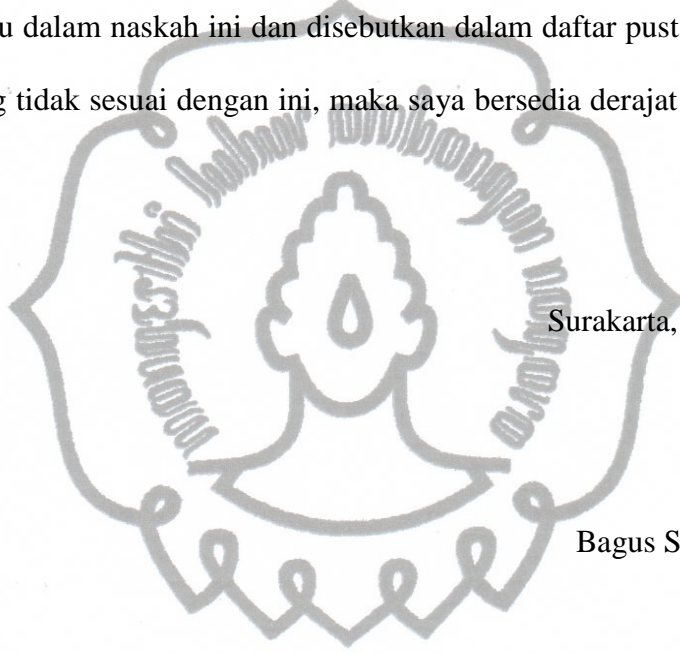
**(Nikola Tesla)**

“Kepuasan terletak pada usaha, bukan pada pencapaian, usaha yang gigih adalah kemenangan yang sempurna.”

**(Mahatma Gandhi)**

## HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang sepengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka. Jika terdapat hal-hal yang tidak sesuai dengan ini, maka saya bersedia derajat kesarjanaan saya dicabut.



Surakarta, 11 Januari 2017

Bagus Surya Premono

## HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala rasa syukur penulis panjatkan kepada Allah swt, penguasa alam semesta yang telah memberikan nikmat berupa kemudahan kepada penulis. Sebagai perwujudan rasa syukur, penulis ingin mempersembahkan karya ini bagi...

Ibu dan bapak yang selalu memanjatkan do'a yang terbaik untuk anak-anaknya termasuk kepada penulis. Ibu dan bapak yang senantiasa mendukung, membantu dan memberi semangat.

Seluruh dosen di program studi Teknik Mesin UNS yang telah memberikan segenap kemampuannya untuk memberikan ilmu yang bermanfaat.  
Semua teman-teman Camro (teknik mesin 2012) yang selalu memberikan kegembiraan, keceriaan dan kemudahan.  
Dan seluruh teman-teman Teknik Mesin UNS yang telah memberikan bantuannya.



## KATA PENGANTAR

Bismillahirrohmanirrohim, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rohmat serta hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyusun dan menyelesaikan skripsi dengan judul “Perancangan *Horizontal Axis Windpump* dengan Kapasitas 65 Liter/menit pada Rentang Kecepatan Angin 4 -6 m/s di Pulau Karimunjawa Kabupaten Jepara” dengan baik.

Laporan ini disusun guna memenuhi mata kuliah wajib Tugas Akhir di Program Studi Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret dan sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Penulis menyadari bahwa tidak mungkin penulis dapat menyelesaikan sendiri laporan tugas akhir ini tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis haturkan kepada:

1. Ibu dan Bapak yang selalu memanjatkan doa, memberikan motivasi, pengorbanan, saran, semangat dan dorongan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
2. Bapak Dominicus Danardono D. P. T. selaku Dosen Pembimbing I dan pembimbing akademis yang senantiasa memberikan arahan, bimbingan, motivasi, dukungan pada segala aktifitas perkuliahan dan penyusunan Tugas Akhir serta memberikan solusi ketika penulis mengalami kendala dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
3. Bapak Syamsul Hadi selaku Dosen Pembimbing II yang memberikan bimbingan, bersedia membantu penulis dalam menyusun Tugas Akhir dari segi tata tulis dan memberi motivasi untuk meraih pencapaian setinggi mungkin.
4. Bapak Budi Santosa, Bapak Budi Kristiawan dan Ibu Indri Yaningsih selaku dosen penguji Tugas Akhir yang turut memberikan masukan dan saran yang membangun kepada penulis dalam penyusunan Tugas Akhir.
5. Bapak Syamsul Hadi selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta.

6. Bapak Nurul Muhayat selaku Koordinator Tugas Akhir.
7. Seluruh staff dosen di Program Studi Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret yang telah memberikan pendidikan dan pengajaran kepada penulis hingga menyelesaikan studi S1.
8. Seluruh staff karyawan administrasi Program Studi Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret yang telah memberikan bantuan dan memudahkan urusan penulis dalam hal administrasi.
9. Saudara-saudara CAMRO (Teknik Mesin angkatan 2012) yang selalu memberikan semangat, saran, bantuan, kegembiraan dan rasa kekeluargaan selama penulis menempuh pendidikan di jenjang S1 Program Studi Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret.
10. Dan seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir, yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih jauh dari kriteria sempurna karena seperti halnya penulis adalah makhluk ciptaan-Nya yang tidak lepas dari kesalahan dan ketidaksempurnaan. Penulis sangat mengharapkan masukan dan saran dari berbagai pihak kepada penulis dalam memperbaiki dan menyempurnakan laporan ini. Akhir kata, semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan berguna bagi kita semua.

Surakarta, 21 Oktober 2016

Penulis